

3. 3. 3 液状化痕等による首都圏の古地震の調査研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

地層記録として保存された液状化痕等の発生履歴を解明し、首都圏における古地震について調査研究を行う。液状化痕等と対応する可能性がある地震の被害との比較から、その地震の特定を試みるとともに考古遺跡の液状化痕データなどとあわせて、首都圏で発生した古地震年表を作成する。

(b) 平成23年度業務目的

平成22年度までに行った南関東の古地震研究を継続して実施し、過去に発生した関東地震のタイプ分け・発生年代・繰り返し間隔の推定を行う。これらから長期予測の基礎となる地震サイクルを解明し、再評価を行う。また地震サイクル解明のために、地形・地質調査検討会を行う。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	教授	佐竹健治	
東京大学地震研究所	名誉教授	島崎邦彦	
東京大学地震研究所	特任研究員	金 幸隆	
広島大学	名誉教授	中田 高	
高知大学	教授	岡村 慎	
高知大学	准教授	松岡裕美	
大阪市立大学	准教授	原口 強	
東京大学新領域研究科	教授	須貝俊彦	
東京大学地震研究所	特任研究員	石辺岳男	

(2) 平成23年度の成果

(a) 業務の要約

関東地震のタイプ分け、発生年代ならびに繰り返し間隔について、地形地質調査の結果、以下が解明された。首都直下で発生する巨大地震として1923年大正関東地震と1703年元禄関東地震が知られる。本年度は、既存研究の隆起量分布に基づき、大正関東地震と元禄関東地震のタイプを整理した。また平成22年度までに三浦半島南部の小網代湾における津波堆積物の調査を実施し、これまで知られていなかった1703年関東地震の一つ前の関東地震の履歴（西暦1060年～1400年の間）を明らかにした。これら過去3回の発生年代に基づくと、関東地震の平均発生間隔は260年～430年であり、また発生間隔は大正と元禄の間で220年、元禄とその一つ前の間で303年～643年と見積もられる。以上のことから我々は、関東地震の発生間隔には「ばらつき」があると推定した。

関東地震のサイクル解明のためには、元禄関東地震以前に発生した地震の発生時期の研究の他に、地震一回ごとの隆起量を解明する必要がある。我々は、最近の新たな技術である航空レーザー測量により海岸の微地形データ（50 cm メッシュの LiDAR データ）を取得し、さらに1946 年米軍撮影および1963 年と1966 年国土地理院撮影の空中写真判読に基づき、地形分類図を作成し、地形地質調査の検討会を実施した。その結果、三浦半島南端部では、比高1~2m の小崖で画された複数段の段丘面が標高10 m 以下に発達していることが解明された。これらの段丘面は、従来から知られていた野比Ⅲ段丘面（標高7~10 m）と元禄関東地震によって形成された段丘面の間に分布している。また城ヶ島の岩石海岸（標高8 m）では複数段の離水波食棚が認定された。それぞれの地形は、過去の関東地震による隆起跡を示す。

また、1921 年（大正10 年）測図の縮尺1:25,000 旧版地形図と1966 年（昭和41 年）改測の縮尺1:25,000 地形図の比較を行った。その結果、大正関東地震の直前の海岸線が従来よりも正確に復元され、海岸線は地震後に海側に大きく後退したことが解明された。小網代湾の湾奥における掘削調査では、1923 年頃に突発的な隆起によって浅海底が干潟になったことが解明され、地形図の比較の結果に合致している。

以上、三浦半島南部の地形調査・地質調査から大正関東地震が海岸地形をどのように変化させたか解明され、元禄関東地震以前の段丘面の発見につながった。

(b) 業務の成果

1) 既存研究に基づく関東地震のタイプ分け

1923 年大正関東地震（大正地震）と1703 年元禄関東地震（元禄地震）は、相模トラフから沈み込むフィリピン海プレートと三浦半島・房総半島の載る本州側のプレートの境界で発生する巨大地震である（図1）が、その隆起様式は大正地震と元禄地震で相違がある（図2）。大正地震では、相模湾の湾奥の足柄平野、湾口部の三浦半島南西端および房総半島南西端がそれぞれ最大約1.5 m 隆起した¹⁾。また大正地震の隆起量分布は全体として北東に減少しており、北東傾斜したフィリピン海プレート上で大正地震は発生した²⁾³⁾⁴⁾。なお地震波から推定されるプレート断層面上の大きなすべり領域は、三浦半島の直下に位置している⁵⁾。元禄地震の隆起量は地震時に離水した海成段丘面の高度から見積もられ、相模湾奥ではよくわからず、三浦半島では大正地震と同程度、房総半島では大正地震よりも大きく、そこでの隆起量は最大約4~6 m であった⁴⁾⁶⁾。段丘面の高度は房総半島の南端から北西に向かって低下しており、南房総沖には房総半島・三浦半島を隆起させる北西傾斜の逆断層が推定されている⁴⁾。以上、隆起様式の違いから、関東地震は、大正型と元禄型の破壊現象に分けられる。

2) 発生間隔・発生履歴に関する課題

関東地震の再来間隔に関しては、地震学的、測地学的、地形学的、地質学的に検討され、約150~1150 年の間で議論が行われている。地震調査研究推進本部⁷⁾は、様々な見解を検討して、大正型地震の再来間隔を200~400 年としている。また元禄型地震の間隔は、主に房総半島に分布する4 段の完新世海成段丘面の年代情報から、2300 年と推定している。

三浦半島では、大正地震・元禄地震で形成された海成段丘面よりも上位（標高 7～20 m）に、3 段の海岸段丘面（上位から野比 I～Ⅲ面）が認められ、それらの年代は野比 I 面：～5200 cal. BC、野比 II 面：～3300 cal. BC、野比 III 面：～1500 cal. BC とされている⁸⁾⁹⁾ [年代値は較正した] (図 3)。これらの段丘面は地震性の隆起により形成された可能性がある。しかし、房総半島に見られるような数百年程度かそれより短い間隔の関東地震に対応する地形の物証は乏しく、三浦半島南部の毘沙門湾で複数段の段丘面があることが国土地理院¹⁰⁾ [1982] によって報告されているだけである。それゆえに、関東地震の発生履歴は十分に明らかにされていない。

3) 航空レーザー測量の実施

三浦半島南部において 2011 年 5 月 21 日 13:00（干潮）に航空レーザー測量を実施し、精密地形データ（LiDAR データ）とオルソ画像を取得した（図 4）。計測は相模湾に面した地域で実施し、計測範囲は北から南に三戸海岸、小網代湾、油壺湾、諸磯湾、浜諸磯・三崎、城ヶ島である。計測データの精度を確認するため、地上の GPS 観測との比較を行った結果、誤差は平均 0.029 m、標準偏差 0.021 m、最大 0.035 m である。したがって LiDAR データからの地形研究は、0.1 m 以上を有効数値として実施する。

計測データから、オリジナルデータとグランドデータを作成し、その上で 50cm メッシュのグリッドデータを作成した。図郭ごとのデータ欠損率は、最大 40.3%、最小 1.8、平均 17.3% であった。欠損率が高いのは、図郭の中に海域が含まれるためである。以上、LiDAR データの精度は精密であるが、データは各地各論で検討しながら使用する。

4) 小網代湾の地形

新第三系・第四系からなる三浦半島の台地には沖積谷が発達し、海岸の川の流出口には干潟や砂浜海岸が形成され、入り江や岬には台地を縁取るように岩石海岸が発達している。とくに三戸海岸には砂浜海岸、小網代湾および油壺湾、諸磯湾の湾奥には沖積谷、また浜諸磯・三崎から城ヶ島にかけて岩石海岸が発達している。

小網代湾は、三浦半島南西端付近に位置し、湾口の幅は約 500 m、湾口から湾奥距離が約 2 km、湾奥に向かって幅が狭くなる内湾の溺れ谷である（図 5）。水深は、最大約 10 m である。

小網代湾の湾奥の潮間帯には干潟が形成されており、干潟には内陸からの小さな川が流れ込んでいる（図 5）。干潟の大部分は、川から運搬された細粒物に堆積され、平らな地形を呈しているが、上流側の川の流出口では干潟は浅く下方浸食され、川の流路が認められる。満潮時には、流路に潮が上がる。

LiDAR データによる断面図（測線 Koa05）によれば、低潮位の標高 -0.7～-0.8 m では平らな干潟が海側から内陸に向かって約 200 m の範囲まで発達し、さらに内陸の沖積谷底に向かって潮間帯では干潟に緩い勾配が認められる（図 6）。潮間帯の潮位差は、約 1.5 m である。沖積谷底には、干潟より高位に高さ 1～2 m の低崖によって画された段丘面が 3 段みとめられる。本研究は、現世の干潟を L0 面とし、それよりも上位に分布する段丘面を下位から上位の順に L1 および L2、L3 面と呼ぶ。これらの段丘面の分布高度は、L0 面：-0.8～0.7 m、L1 面：1.4～3.1 m、L2 面：3.2～5.1 m、L3 面：6.0～6.5 m 以上である。L1 面の高度は内陸から海側に

向かって低くなり、勾配は海側に向かって緩くなっている。また図 6 に示した海側の (L) 区間では、L1 面は平らな段丘面を呈している。L1 面は現世干潟に相似しており、同段丘面は初生的には沖積谷底の川の流出口付近に形成された干潟であった可能性がある。1923 年関東地震の直前で西暦 1921 年に作成された地形図では、L1 面の分布域は干潟であった (図 7)。その干潟が、1921 年以後に段丘化したと推察される。

小網代湾内や三浦半島南部の他の場所には、野比Ⅲ面 (標高 7~10 m) と現在の海岸線の間、比高 1~2m の小崖で画された 5 段の段丘面 (低位から高位の順に L1 面、L2 面、L3 面、L4 面、L5 面) が認められる (図 7、測線 Koa01、03、04)。最上位の L5 面は高度 9.2~10.3 m に分布し、野比Ⅲ面に対応する。同面よりも下位の L3 面と L4 面は、Koa03 地点でそれぞれ 5.0~5.9 m および 6.7~7.2 m の高度に分布している。同地点の L3 面の高度は上述の小網代湾奥 Koa05 地点における L3 面の高度 (6.0~6.5 m) よりも低い、L1 面や L2 面は小網代湾内においてほぼ同じ高度に分布している。地震性変動による地殻変動量を解明するために、今後、これらの段丘面の形成環境を解明していく必要がある。また三浦半島南部の城ヶ島の岩石海岸 (標高 8 m) では、複数段の離水波食棚が認められる。それぞれの地形は、地震性の隆起を示す可能性がある。

5) 旧版地形図を用いた関東地震の直前の海岸線の復元

我々は、1921 年 (大正 10 年) 測図と 1966 年 (昭和 41 年) 改測の旧版地形図 (縮尺 25,000 分の 1) を比較して、関東地震の直前の海岸線を復元した (図 7)。地図 a と b を比較すると、1921 年地図に描かれた海岸線は 1966 年よりも明確に内陸側に分布している。海岸線の位置が変わらないところは、急崖や急勾配の斜面に海面が接している。内湾奥の干潟部では勾配が緩いため、1921 の地図に現れていた干潟は 1923 年の関東地震によって離水し、L1 面が形成された可能性がある。この地震によって海岸線は約 200 m 後退し、1921 年時と 1966 年時の海岸線との間に新期の干潟が形成された。三浦半島の沿岸に認められる勾配の緩やかな波食棚は、1923 年の大正関東地震によって離水して、段丘面になっている可能性がある。1921 年や 1966 年の地図の海岸線の位置には、それぞれ比高 1~2 m の崖によって画された段丘面が分布している (図 6)。

以上、新旧の地形図の比較によって、大正地震の直前の海岸線が、従来よりも正確に復元された。これにより、大正型の関東地震が海岸地形をどのように変化させたかがわかり、元禄関東地震以前の関東地震によって形成された段丘面の発見につながる可能性がある。

6) 堆積物調査による現世干潟の成因

小網代湾の湾奥の自然環境が関東地震によってどのように変化し、どのように干潟が形成されたのかを解明するために、小網代湾の湾奥の干潟における深さ約 2.5 m の掘削調査を実施し、干潟堆積物 (シルト質砂) と浅海堆積物 (砂質シルト) を採取し粒度分析、珪藻分析および年代調査を実施した。その結果、隆起に起因した急激な堆積環境の変化と津波堆積物が認められ、小網代湾の湾奥は 1923 年大正関東地震によって浅海から干潟へ急激に移行したことが解明された。

干潟・浅海堆積物は、細粒物質から構成される。その細粒物質の中から厚さ 50 cm 未満の砂礫層が 3 枚認められ、同層を上位より T1、T2、T3 とした（図 8、図 9）。砂礫層の基底は侵食され、侵食面の上に砂礫層は堆積している。砂礫層には、多量の貝殻片および岩片が含まれ、貝殻片や岩片は砂や礫と混合されている。砂礫層の粒度は、砂礫層の最下部から中央部にかけて相対的に細粒から粗粒に変わり、最上部には偽礫が含まれているコアもある。以上の堆積構造に基づくと、砂礫層の堆積時には、速度勾配を伴いながら、速く・強い濁流（掃流）が小網代湾の湾奥において生じていた可能性がある。

こうした掃流の起源を明らかにするために、古環境の変動についての連続的コア分析を行った（図 9）。コアの分析は、堆積物の粒度と堆積物に含まれる珪藻である。分析の間隔は、深さ方向に 2 cm で実施された。堆積物は、シルト、細粒砂、中粒砂および粗粒砂の 4 段階に篩い分けした。

T1、T2 および T3 の直上で粒度は変わり（図 9）、海に近い掘削地点（サイト A の T2）の上では粒度は急激に細粒化し、シルト・細粒砂が 95% 以上であり、堆積物は淘汰されている。それ以外の掘削地点では、粒度は急激に粗粒化している（図 9、サイト A～D）。海側では、波の影響を受けやすい。また河口に近い場所では、川からの影響を受けやすい。水深が急激に浅くなれば、海側の海底堆積物は波によって淘汰され、陸側の浅海堆積物（河口堆積物）は川からの流れによって粗粒化する。

珪藻殻は、海性浮遊生種、海性底生種、汽水生種、淡水生種に区分した。T1 の上では、淡水と汽水の珪藻が急激に増える。T1 よりも下位では、これらの種は少なく、海性の珪藻が優勢である。海性浮遊生種と海性底生種の比率をみると、T2 の上で底生種が急激に増え、浮遊性種は激減している。T3 よりも下位では、珪藻は認められなかったが、T1 と T2 の堆積時に、水深が急激に浅くなったことが推察される。

各イベント間では、粒度は上方に向かって徐々に細粒化、珪藻について海性浮遊性種は如々に増加している。水深が如々に深くなっている。油壺の験潮場では、大正関東地震の地震時に 1.4 m の隆起と地震間の沈降（1950 年以降約 40 cm）が記録されている。粒度と珪藻の分析結果は測地データに調和的であり、堆積物の調査から地震時の隆起と地震間の沈降が繰り返されていることが判明した。T1、T2 および T3 の堆積物は、地震時の地殻変動を伴うことから、関東地震の津波に起因する。

以上の地形・地質研究により、小網代湾の湾奥に認められた干潟は（図 5、図 6）、関東地震の繰り返しによって海底が隆起し、1923 年大正関東地震の時に形成されたことが判明した。今後、同地域に分布する段丘面の調査によって形成環境が分かれば、関東地震による隆起量が導出できる可能性がある。

7) 関東地震の年代と発生間隔

小網代湾の干潟は、1923 年大正関東地震によって形成されたことが、上述した地形調査・地質調査・年代調査によって解明された。堆積年代について詳細に検討した結果、最上部の津波堆積物 T1 は 1923 年大正関東地震、真ん中の津波堆積物 T2 は 1703 年元禄関東地震の津波であることが判明した（図 8、図 10）。図 10 下段の年代は、津波堆積物 T3 の年代推定の計

算に用いられた年代値のみを記載している。最下部の津波堆積物 T3 は 1060 年以降、1400 年以前に堆積したと推定され、元禄関東地震の一つ前の地震の発生履歴が解明された (図 10)。T3 の年代値は、放射性炭素年代測定により二つの可能性 (ケース a と b) に絞り込まれる。年代測定試料の 8、10、33、35、36 は、T3 よりも下位に堆積する有機物 (試料 41 と 42) の年代値と同程度からそれよりも古いため、これらの有機物は年代的に T3 以前に生成された可能性もある。本研究では、これら 5 つの有機物が T3 堆積以後と T3 堆積前に生成されたと二通りの可能性を考えて、T3 の年代計算にそれぞれこれら 5 つの有機物の年代値を取り除かない場合 (ケース a) と、取り除いた場合 (ケース b) の可能性を示した。T3 の発生年代は、ケース a と b でそれぞれ 1060~1159 年および 1170~1400 年である。

平均的な地震の繰り返し間隔は本研究では平均 260 年~430 年と見積られ、この値は地震調査研究推進本部による見積もり 200 年~400 年と調和的である。繰り返し間隔については、1923 年大正関東と 1703 年元禄関東の地震間隔は 220 年、その一つ前の間隔は 303 年~643 年と積られ、関東地震の発生間隔には「ばらつき」があることが判明した。

(c) 結論ならびに今後の課題

小網代湾の湾奥における掘削調査では、関東地震に伴う津波堆積物が三枚認定され、それらの堆積年代は 1923 年、1703 年および 1060 年~1400 年と推定された。これによって、元禄関東地震の一つ前の地震の履歴が解明され、関東地震の繰り返し間隔には「ばらつき」があることが判明した。また同掘削調査によって、1923 年の関東地震によって湾奥の干潟が形成され、地図の検討で示されていた海岸線の変化の要因が関東地震であることが明確になった。

航空レーザー測量により、詳細な地形分類が可能になり、元禄関東地震以前の地震に伴う段丘面が複数段認定され、掘削調査で明らかになった 3 つ前の地震よりもさらに古い関東地震の履歴が解明される可能性がでてきた。また空中写真の判読と旧版地形図の検討により、1923 年大正関東地震の直前の海岸が復元された。今後、さらに長期間の関東地震の規模・場所・時期の履歴を解明するためには、掘削調査による堆積構造の各種分析と年代測定や地殻変動量の情報を得ることが望ましい。

(d) 引用文献

- 1) Miyabe, N.: On the vertical earth movements in Kwanto districts, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **9**, 1-21, 1931.
- 2) Ando, M.: A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **49**, 19-32, 1971.
- 3) Kanamori, H.: Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **49**, 13- 18, 1971.
- 4) Matsuda, T., Y. Ota, M. Ando and N. Yonekura: Fault mechanism and recurrence time of major earthquakes in southern Kanto district, Japan, as deduced from coastal terrace data, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **89**, 1610-1618, 1978.

- 5) Kobayashi, R. and K. Koketsu: Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, *Earth Planets Space*, **57**, 261-270, 2005.
- 6) 穴倉正展:変動地形から見た相模トラフにおけるプレート間地震サイクル, 地震研究所彙報, **78**, 245-254, 2003.
- 7) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:相模トラフ沿いの地震活動の長期評価, 31pp., http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04aug_sagami/index.htm, 2004.
- 8) 熊木洋太:三浦半島の完新世の地殻変動, 国土地理院時報, **54**, 41-49, 1981.
- 9) Kumaki, Y.: The deformations of Holocene marine terraces in southern Kanto, central Japan, *Geogr. Rev. Japan*, **58 (Ser. B)**, 49-60, 1985.
- 10) 国土地理院地理調査部:三浦半島変動地形調査, **25**, 26-28 and 88-90, 1981.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
関東地震のタイプ分けと再来間隔に関する研究の整理（ポスター）	金 幸隆	2011年地球惑星連合大会,	平成22年5月	国内
関東地震のタイプ分けと再来間隔に関する研究の整理(2):地形の形成年代に関して（ポスター）	金 幸隆	第28回歴史地震研究会、新潟	平成22年9月	国内
旧版地形図を用いた大正関東地震前の三浦半島南部の海岸線を復元する試み（ポスター）	熊木洋太・ 金 幸隆・ 佐竹健治	日本地理学会、 2011年度秋季大会、大分	平成22年10月	国内
LIDARデータ, 空中写真, 旧版地形図の分析から推定された三浦半島南部の海岸線の変化と過去複数回の関東地震（口頭）	金 幸隆・ 熊木洋太・ 佐竹健治	日本地震学会、2011年度秋季大会、静岡	平成23年11月	国内
Geomorphic Evidence of Coseismic Coastline Changes in Southern	Kim, H., Y. Kumaki, K. Satake	2011 AGU、San Francisco	平成23年12月	国際

Miura Peninsula Associated with the Recent Kanto Earthquakes: Analysis of the LIDAR Data, air Photos and Topo Maps (ポスター)				
三浦半島小網代湾内でのジオスライサー掘削：関東地震履歴解明に向けて (口頭)	島崎邦彦・ 石辺岳男・ 佐竹健治・ 須貝俊彦・ 千葉 崇・ 岡村 眞・ 松岡裕美・ 藤原 治	日本地震学会、2011年度秋季大会、静岡	平成23年11月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所 (雑誌等名)	発表時期	国際・国内の別
Geological Evidence of Recurrent Great Kanto Earthquakes at the Miura Peninsula, Japan	Shimazaki,K., H. Kim, T. Chiba, K. Satake	Journal of Geophysical Research	平成23年	国際

マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果（記事タイトル）	対応者氏名	報道・掲載機関 (新聞名・TV名)	発表時期	国際・国内の別
「関東地震」新たな隆起跡 三浦半島で段丘面発見	金 幸隆	共同通信：神奈川新聞（1面）	平成23年10月13日	国内
元禄時代以前「関東地震」新たな隆起跡	金 幸隆	共同通信：山形新聞	平成23年10月13日	国内

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

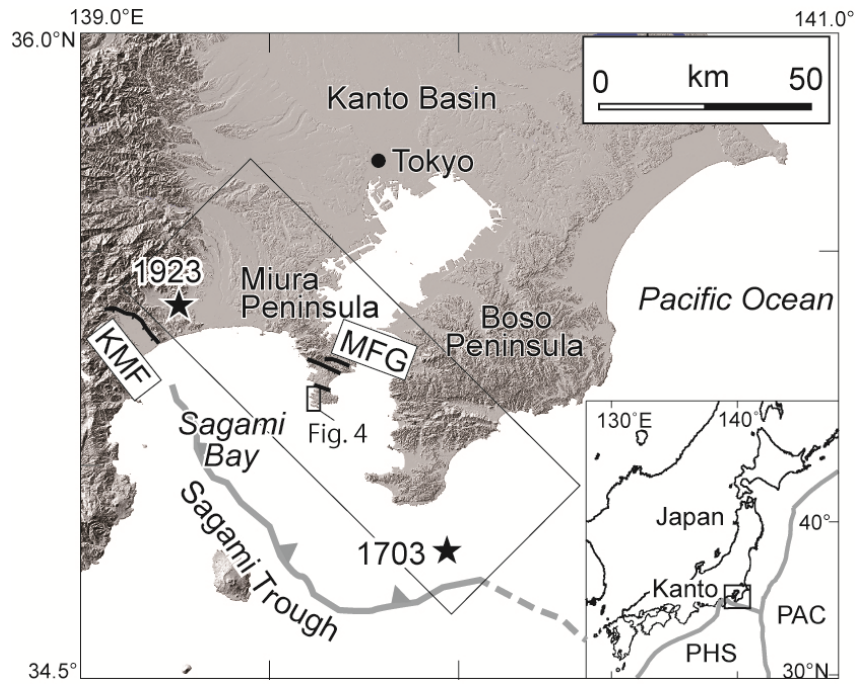


図1 関東地震の位置。図4の範囲は、調査の範囲を示す。

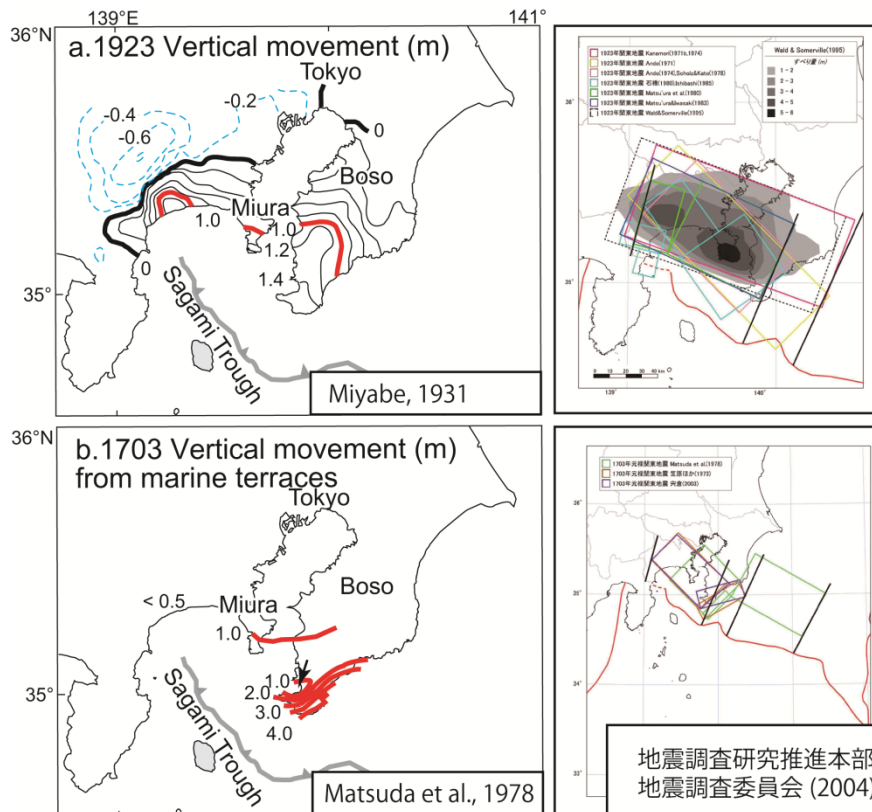


図2 1923年大正関東地震(上)¹⁾⁷⁾と1703年元禄関東地震(下)⁴⁾⁷⁾の上下地殻変動量(左)と震源断層の位置(右)

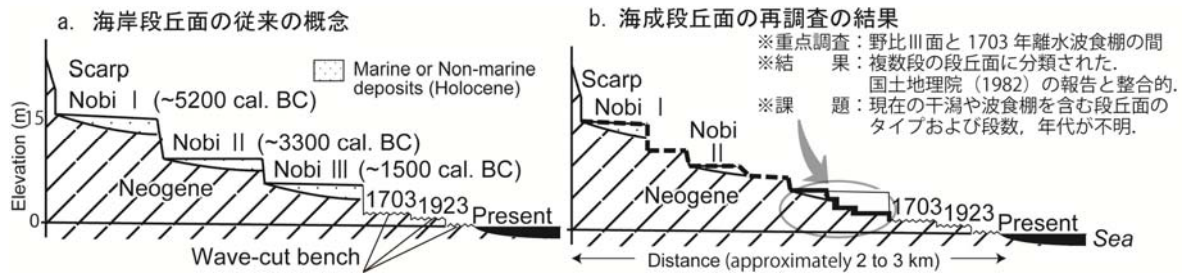


図3 三浦半島の海成段丘面の分類

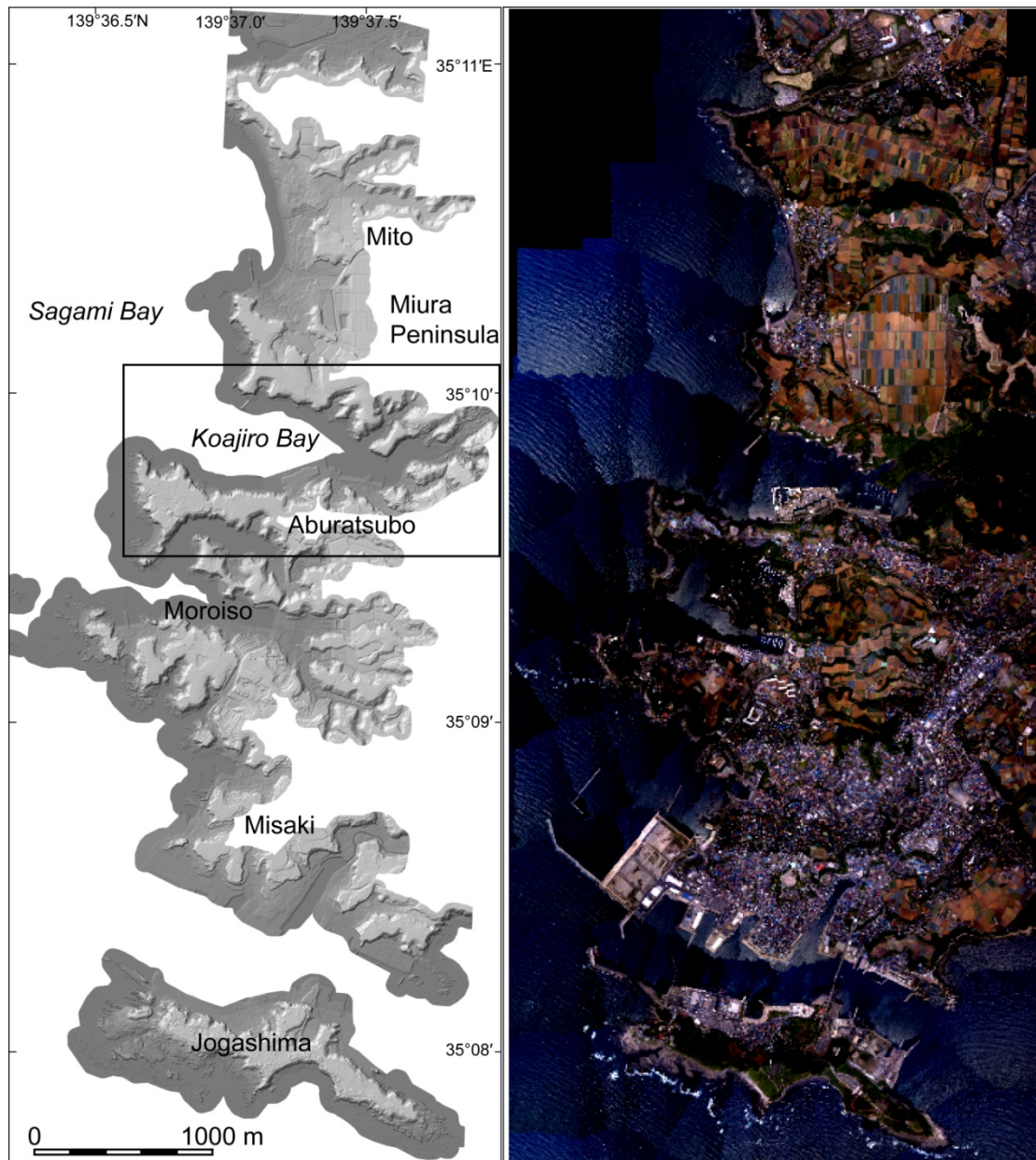


図4 三浦半島南部の航空レーザー測量による50cmメッシュ陰影図（左）とオルソ画像（右）。計測範囲は、図1に示す。

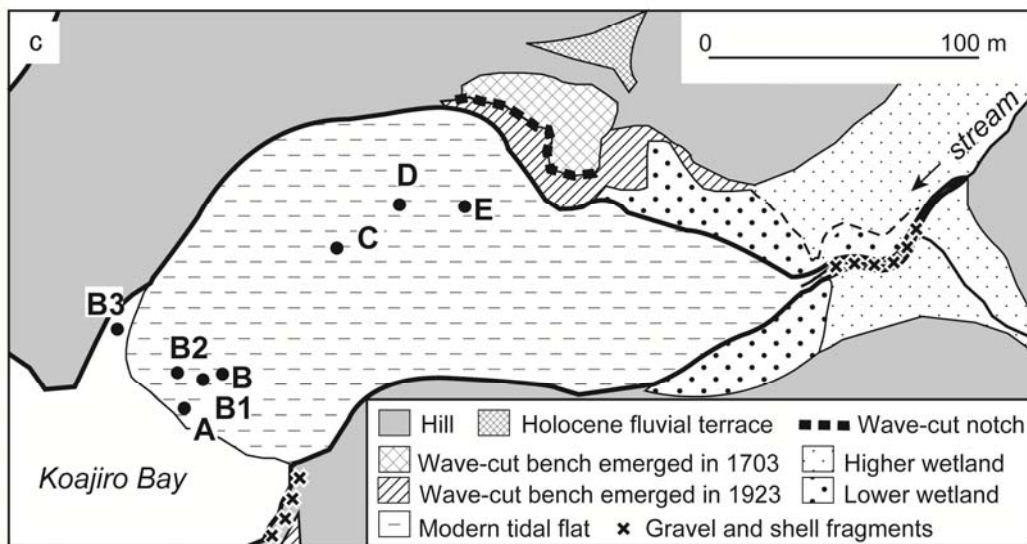
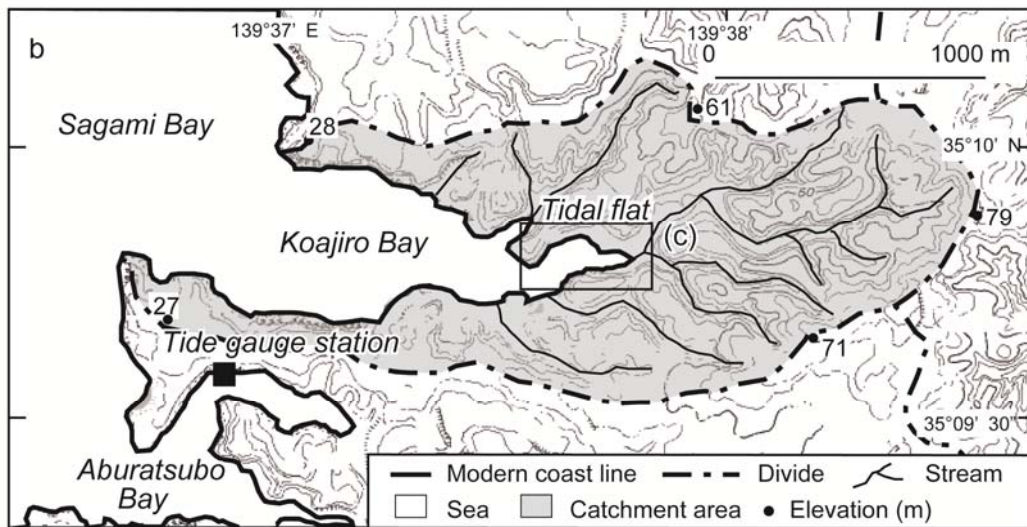
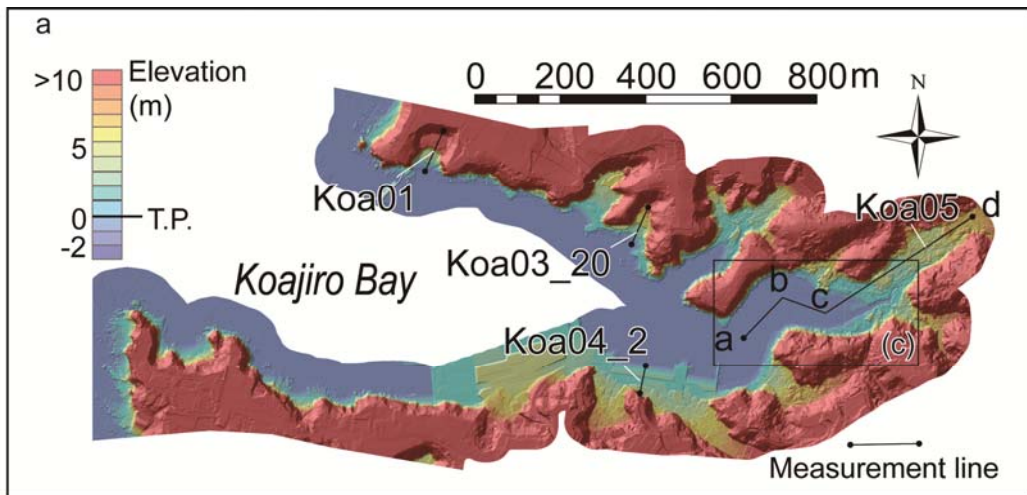


図5 小網代湾の陰影図(a)、水系図(b)、地形分類図(c)。位置は、図4に示す。Koa01、03_20、04_2、05は地形断面の測線。●印は掘削地点。

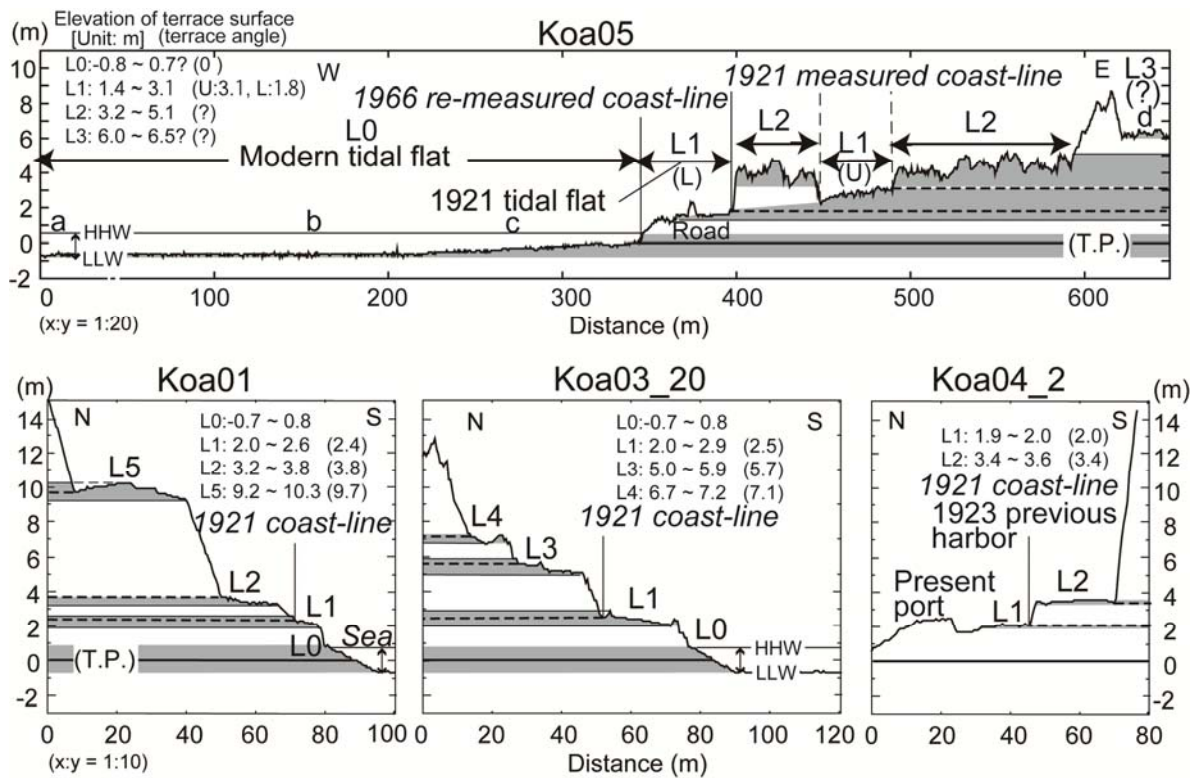
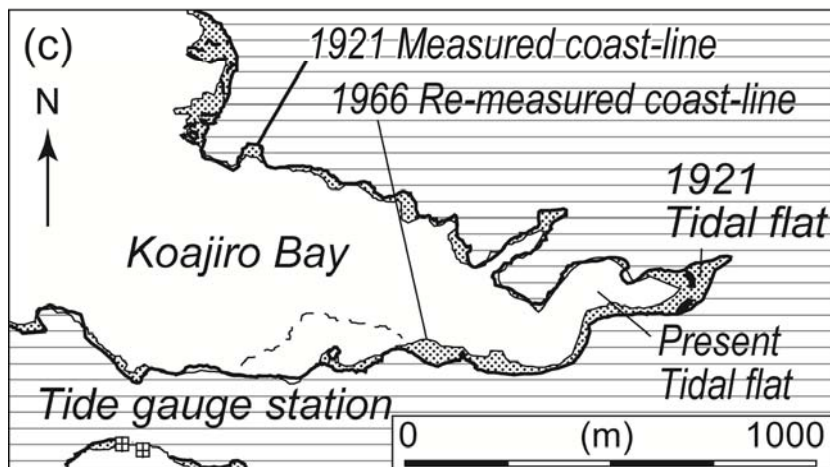


図6 Lidar データに基づく小網代湾の海成段丘面の断面図
 測線の位置は、図5に示す。



Land area since pre-1921
 Newly-formed land area after 1921 and before 1966
 Sea in 1966

図7 1921年測量 (a) と1966年測量 (b) の縮尺1:25,000地形図による海岸線の比較 (c)

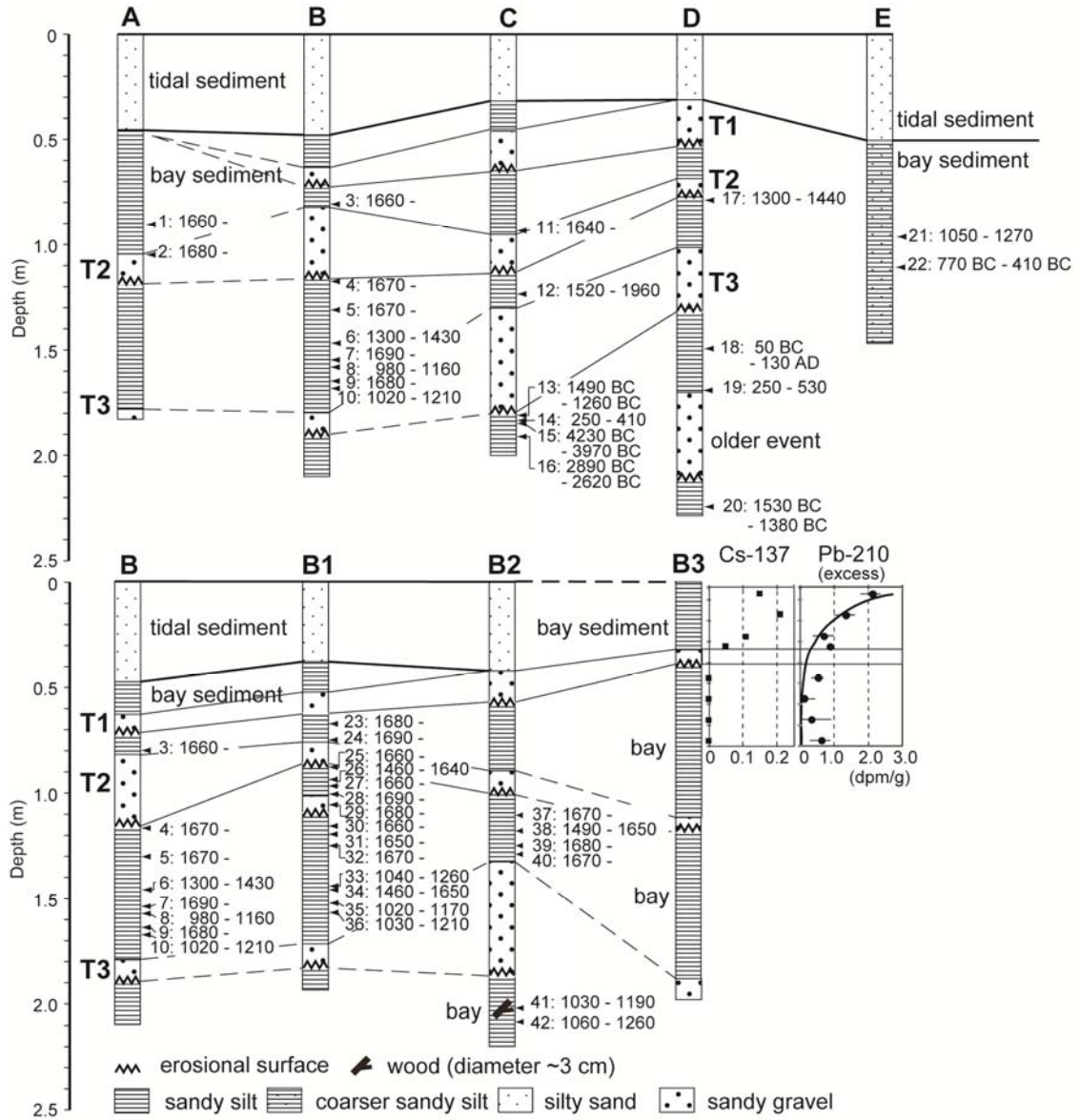


図8 小網代湾の柱状図と年代。柱状図の位置は、図5に示す。

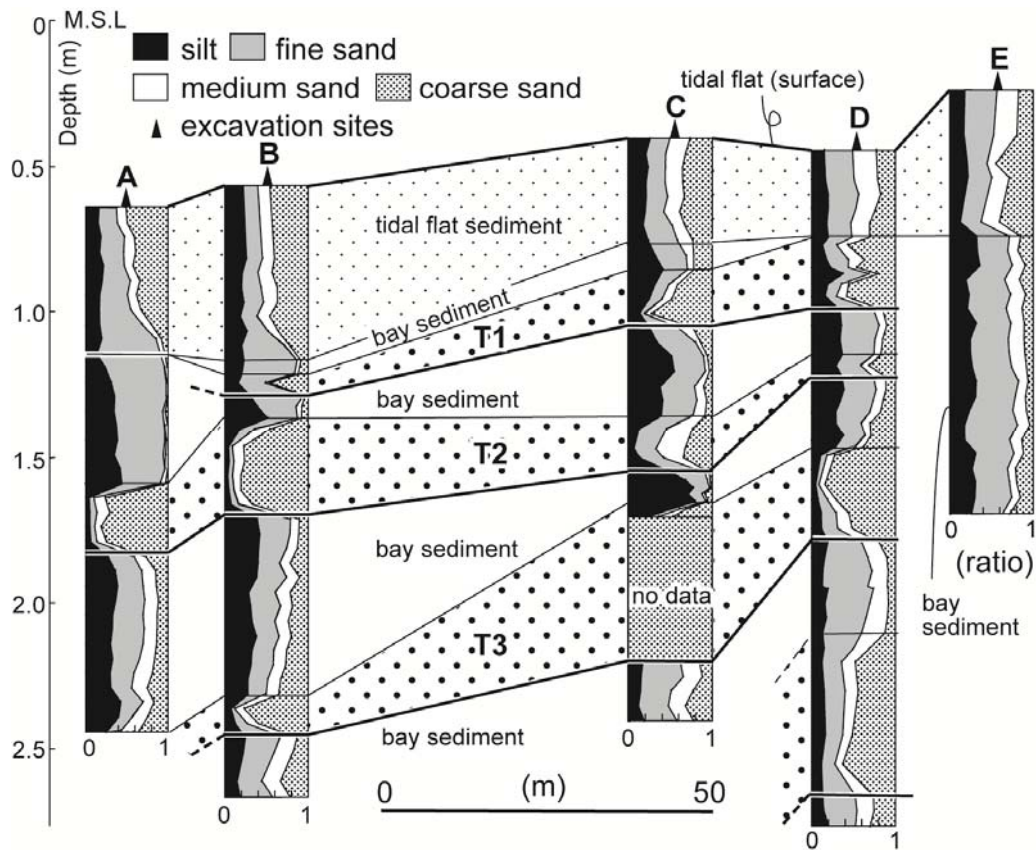


図9 粒度分析に基づく層序区分と堆積環境

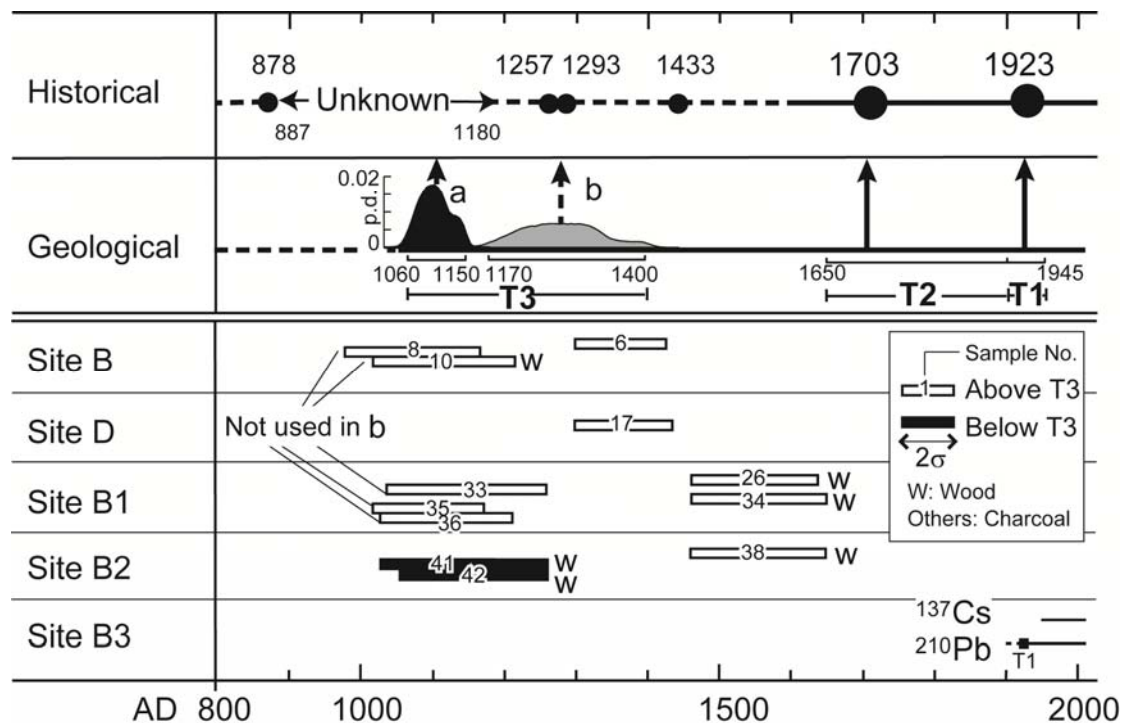


図10 過去三回の関東地震の発生時期と歴史地震との比較。